

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2014. Т. 17, № 3. С. 206–210.
ISSN 1609–3577. DOI: 10.17073/1609–3577–2014–3–206–210

УДК 536.413:621.315.592

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

© 2014 г. А. Ф. Коваленко, А. А. Воробьев

Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого
Китайгородский проезд, д. 9/5, Москва, 103074, Россия

В рамках квазистатической несвязанной задачи термоупругости рассмотрен односторонний нагрев пластины со свободной поверхностью импульсным лазерным излучением. Получено аналитическое соотношение, являющееся критерием термпрочности пластины и позволяющее определять неразрушающие режимы лазерной обработки диэлектрических и полупроводниковых пластин. Модель расчета получена при допущении о независимости теплофизических, механических и оптических свойств материалов от температуры. Проведена экспериментальная проверка адекватности модели расчета, показавшая вполне удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: лазерная обработка, пластина, квазистатическая задача термоупругости, неразрушающие режимы, диэлектрические и полупроводниковые материалы.

Введение

Для обработки диэлектрических и полупроводниковых материалов, наряду с традиционным высокотемпературным отжигом, используют облучение их поверхности непрерывным или импульсным лазерным излучением [1]. Быстрый нагрев поверхности пластины лазерным излучением до температуры отжига и медленное ее охлаждение приводят к релаксации остаточных напряжений в приповерхностном слое пластины.

В области полупроводниковой электроники широко применяют метод ионной имплантации, после которой приповерхностная область монокристаллического полупроводника имеет сильно нарушенную структуру [1], восстановить которую можно при помощи лазерного отжига. В последние годы в оптоэлектронике и нелинейной оптике активно используют композици-

онные материалы, содержащие металлические наночастицы [2]. Одним из известных способов контролируемой модификации металлических наночастиц в диэлектриках является термический отжиг. В работе [3] показано, что для этой цели подходит и лазерный отжиг. Так, в работе [4] был предложен режим лазерного отжига, при котором силикатное стекло с ионно-синтезированными металлическими наночастицами облучали мощными импульсами эксимерного лазера в области фундаментального поглощения стекла.

При одностороннем нагреве пластины лазерным излучением могут возникать такие режимы обработки, при которых термоупругие напряжения будут определяющими в технологическом процессе. Задача определения неразрушающих режимов лазерного отжига свободно заземленной пластины поверхностным источником решена в работе [5]; а в работе [6] рас-

Коваленко Александр Федорович — доктор техн. наук, профессор, e-mail: alexanderfkov@yandex.ru; Воробьев Алексей Александрович — кандидат техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, e-mail: vorobievall@mail.ru.

смотрены неразрушающие режимы импульсного лазерного отжига свободно заземленных пластин из неметаллических материалов. Многие диэлектрические и полупроводниковые материалы обладают объемным поглощением излучения применяемых технологических лазеров. С целью определения неразрушающих режимов лазерной обработки рассмотрим решение несвязанной квазистатической задачи термоупругости для пластины со свободной поверхностью, обладающей объемным поглощением лазерного излучения. Будем считать пластину термостойкой, если она не разрушается термоупругими напряжениями при нагреве ее поверхности до температуры отжига. Ограничимся рассмотрением времени воздействия лазерного излучения значениями более 10^{-6} с, для которых можно пренебречь динамическими эффектами и рассматривать квазистатическую задачу термоупругости [7—9], и показателя поглощения материала пластины более $0,1 \text{ см}^{-1}$, когда эффектами разрушения прозрачных оптических материалов (разрушение на поглощающих включениях, неоднородностях, лавинная ионизация и др.) можно пренебречь.

Модель расчета

Рассмотрим пластину со свободной поверхностью толщиной h ограниченную двумя плоскостями $\pm h/2$ и цилиндрической поверхностью с замкнутой направляющей. Теплофизические, механические и оптические свойства пластины примем независимыми от температуры. На поверхность $-h/2$ воздействует лазерный импульс.

Если выполняется условие

$$\chi \sqrt{a\tau_u} \ll 1, \quad (1)$$

где χ — показатель поглощения материала пластины на длине волны лазерного излучения; a — коэффициент температуропроводности материала пластины; τ_u — длительность лазерного импульса, то температурное поле в пластине к концу действия лазерного импульса будет определяться уравнением [1]

$$T(z) = T_0 + \frac{(1-R)\chi W e^{-\chi(z+h/2)}}{c\rho}, \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура пластины; R — коэффициент отражения пластины; c, ρ — удельная теплоемкость и плотность материала пластины соответственно; z — координата, отсчитываемая от

серединной поверхности пластины; $W = \int_0^{\tau_u} q(t) dt$ — плотность энергии лазерного излучения; $q(t)$ — плотность мощности лазерного излучения.

Для пластины со свободной поверхностью, в соответствии с принципом Сен-Венана, равнодействующее усилие и равнодействующий момент на

контуре должны быть равны нулю [10]. Поэтому термоупругие напряжения, возникающие в ней, определяются соотношением [10]

$$\begin{aligned} \sigma_x(z, t) &= \sigma_y(z, t) = \\ &= \frac{E}{1-\nu} \left\{ \varepsilon_T + \chi \chi_T - \alpha_T [T(z, t) - T_0] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где:

$$\varepsilon_T = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \alpha_T [T(z, t) - T_0] dz; \quad (4)$$

$$\chi_T = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \alpha_T [T(z, t) - T_0] z dz; \quad (5)$$

E — модуль Юнга материала пластины; ν — коэффициент Пуассона; α_T — коэффициент линейного расширения.

Подставив выражение (2) в уравнения (3)—(5) и выполнив математические преобразования, получим уравнение для расчета термоупругих напряжений в пластине:

$$\begin{aligned} \sigma_x(z) &= \sigma_y(z) = \frac{E\alpha_T\chi W(1-R)}{(1-\nu)c\rho} \times \\ &\times \left\{ \frac{1-e^{-\chi h}}{\chi h} + \frac{12}{(\chi h)^2} \left[1 - \frac{\chi h}{2} - \right. \right. \\ &\left. \left. - e^{-\chi h} \left(\frac{\chi h}{2} + 1 \right) \right] \frac{z}{h} - e^{-\chi(z+h/2)} \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Распределение температуры и термоупругих напряжений, возникающих в пластине из цветного оптического стекла ЖЗС12 толщиной 1 см при воздействии лазерного импульса длительностью 10^{-3} с и плотностью энергии $W = 100 \text{ Дж/см}^2$ представлено на рис. 1. Из рис. 1 видно, что в области высоких температур термоупругие напряжения являются сжимающими, изменяются до нуля, становятся растягивающими, достигают максимального значения, затем уменьшаются и вновь становятся сжимающими.

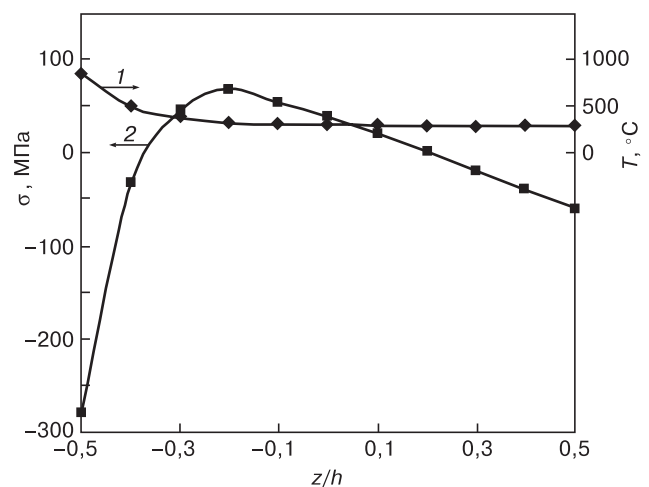


Рис. 1. Распределение температуры T (1) и термоупругих напряжений σ (2) по толщине пластины

ми. Максимальные сжимающие напряжения возникают на облучаемой поверхности пластины. Так как хрупкие материалы имеют предел прочности на растяжение примерно в 5–8 раз меньше, чем на сжатие [11], дальнейший анализ проведем для растягивающих напряжений.

Исследования на экстремум уравнения (6) показали, что максимальные растягивающие напряжения возникают в сечении с координатой

$$z_{\max} = -\frac{h}{2} + \frac{\ln \frac{(\chi h)^3}{12[\chi h/2 + e^{-\chi h}(\chi h/2 + 1) - 1]}}{\chi} \quad (7)$$

или

$$\frac{z_{\max}}{h} = -\frac{1}{2} + \frac{\ln \frac{(\chi h)^3}{12[\chi h/2 + e^{-\chi h}(\chi h/2 + 1) - 1]}}{\chi h} \quad (8)$$

На рис. 2 показана зависимость безразмерной координаты максимальных растягивающих напряжений от безразмерного параметра χh . Из рис. 2 видно, что увеличение параметра χh приводит к смещению координаты максимальных растягивающих напряжений к облучаемой поверхности.

Из выражения (6) получим уравнение для расчета плотности энергии лазерного излучения, необходимой для разрушения пластины термоупругими напряжениями

$$W_T = \frac{\sigma_{BP}(1-\nu)cp}{E\alpha_T(1-R)\chi \left\{ \frac{1-e^{-\chi h}}{\chi h} + \frac{12}{(\chi h)^2} \left[1 - \frac{\chi h}{2} - e^{-\chi h} \left(\frac{\chi h}{2} + 1 \right) \right] \frac{z_{\max}}{h} - e^{-\chi(z_{\max}+h/2)} \right\}}, \quad (9)$$

где σ_{BP} — предел прочности материала пластины на растяжение.

Из формулы (2) получим уравнения для расчета плотности энергии лазерного излучения, необходимой для достижения поверхностью пластины температуры отжига

$$W_f = \frac{(T_f - T_0)cp}{(1-R)\chi}, \quad (10)$$

где T_f — температура отжига материала пластины.

Разделив выражения (9) на (10) и поставив условие $W_T/W_f \geq 1$, получим критерий термпрочности пластины со свободной поверхностью из диэлектрических или полупроводниковых материалов при импульсном лазерном отжиге

$$\frac{\sigma_{BP}(1-\nu)}{E\alpha_T(T_f - T_0)} \geq \left\{ \frac{1-e^{-\chi h}}{\chi h} + \frac{12}{(\chi h)^2} \times \left[1 - \frac{\chi h}{2} - e^{-\chi h} \left(\frac{\chi h}{2} + 1 \right) \right] \frac{z_{\max}}{h} - e^{-\chi(z_{\max}+h/2)} \right\}. \quad (11)$$

Физический смысл критерия заключается в следующем: достижение поверхностью пластины тем-

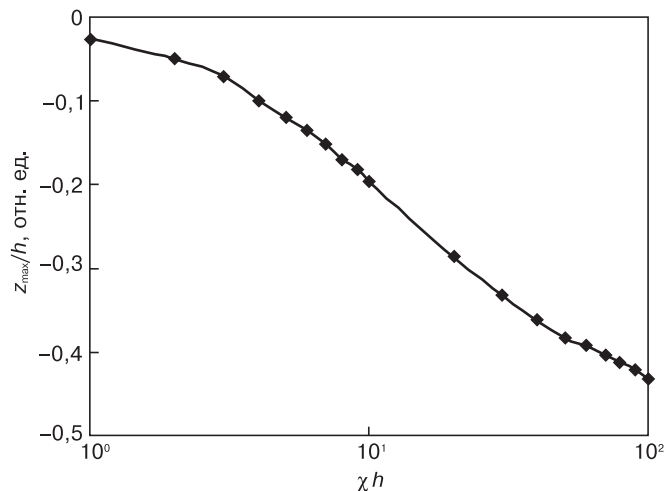


Рис. 2. Зависимость z_{\max}/h от безразмерного параметра χh

пературы отжига должно происходить при меньшей плотности энергии, чем требуется для разрушения ее термоупругими напряжениями.

Результаты и их обсуждения

Проведем анализ соотношения (11). Левая часть неравенства не зависит от безразмерного параметра χh и является безразмерной константой, характеризующей отношение предела прочности материала пластины к максимально возможным термоупругим напряжениям в ней. Правая часть неравенства

является монотонной выпуклой функцией безразмерного параметра χh . Исследования на экстремум функции $f(\chi h)$ показали, что она достигает максимального

значения, равного 0,15, при $\chi h \approx 8$. На рис. 3 показано графическое решение неравенства (11) для пластины из цветного (желто-зеленого) оптического стекла ЖЗС12. На рис. 3 можно выделить три области. В области I $\chi h < (\chi h)_1$, и неравенство (11) выполняется. Следовательно, можно осуществлять импульсный

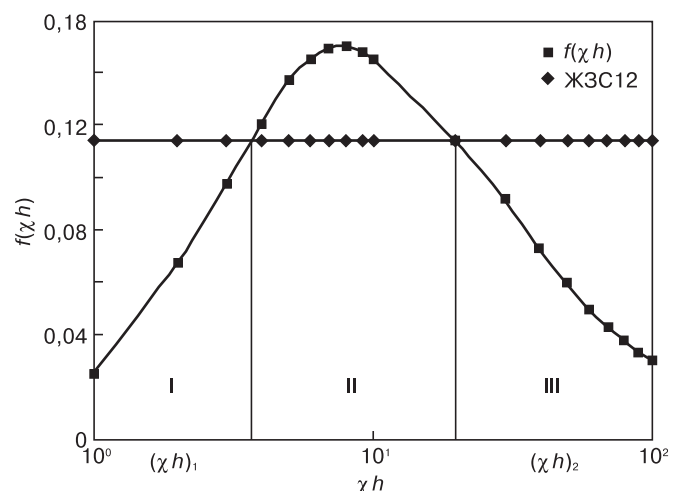


Рис. 3. Графическое решение неравенства (11) для оптического стекла ЖЗС12

лазерный отжиг, не опасаясь разрушения пластины термоупругими напряжениями. В области II $(\chi h)_{II} < \chi h < (\chi h)_{III}$, неравенство (11) не выполняется. Разрушение пластины термоупругими напряжениями произойдет при меньших плотностях энергии, чем требуется для достижения ее поверхностью температуры отжига. В области III параметр $\chi h > (\chi h)_{III}$, и неравенство (11) вновь выполняется. Следовательно, можно осуществлять лазерный отжиг пластин. Так как толщина пластины может быть фиксированной, необходимо выбирать длину волны технологического лазера таким образом, чтобы показатель поглощения материала пластины позволял осуществлять отжиг в областях, где неравенство (11) выполняется.

Анализ свойств ряда материалов показал, что для оптических стекол [12] (кроме кварцевых), оптической керамики KO_3 и KO_4 , полупроводниковых материалов Ge, ZnSe, GaAs, Si [5, 6, 13] и др., левая часть неравенства (11) меньше 0,15 и существует область изменения параметра χh , в которой возможно разрушение пластины термоупругими напряжениями.

Следует отметить, что неравенство (11) получено при условии независимости показателя поглощения материала пластины от температуры. Для полупроводниковых материалов показатель поглощения на длине волны воздействующего лазерного излучения существенно увеличивается с ростом температуры в процессе воздействия [1]. Если для этих материалов был выбран режим обработки в области малых значений параметра χh , то увеличение показателя поглощения в процессе воздействия может привести к невыполнению условия (11) и разрушению пластины термоупругими напряжениями. Поэтому для полупроводниковых материалов предпочтительным является режим обработки с параметрами $\chi h > (\chi h)_{III}$. В этом случае увеличение показателя поглощения «пойдет в запас прочности» пластины.

Если материал пластины обладает такими свойствами, что левая часть неравенства (11) больше 0,15, то критерий термпрочности выполняется при

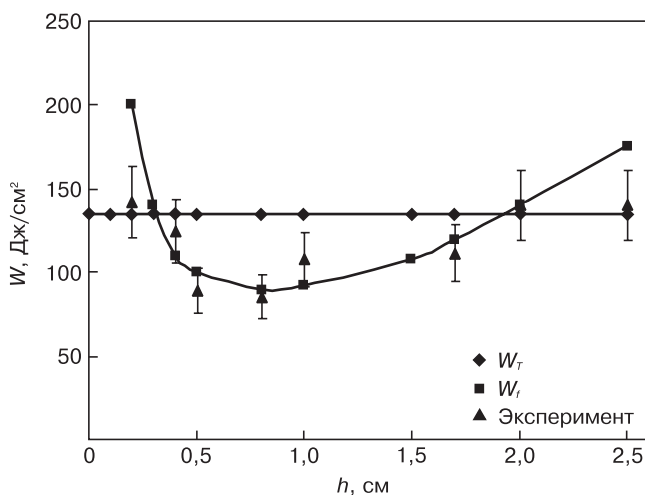


Рис. 4. Зависимости плотности энергии W_T и W_I от толщины пластины

любых значениях параметра χh и пластина не будет разрушена термоупругими напряжениями. Например, для кварцевых стекол левая часть неравенства (11), рассчитанная в работах [5, 6] с использованием исходных данных из работы [14], составляет 0,83.

Экспериментальная проверка адекватности модели расчета

Для проверки адекватности расчетной модели провели экспериментальные исследования воздействия излучения лазера ГОС1001 с длиной волны 1,06 мкм и длительностью импульса 10^{-3} с на пластины из оптического цветного стекла ЖЗС12 толщиной от 0,2 до 2,5 см и диаметром 2,5 см. Показатель поглощения оптического цветного стекла ЖЗС12 на длине волны 1,06 мкм составляет 10 см^{-1} [15]. В ходе экспериментов измеряли следующие параметры:

- энергию излучения лазера (с помощью термпарного преобразователя Ophir 12A-P);
- диаметр пятна излучения в плоскости исследуемого образца (анализатором профиля лазерного луча Ophir SP620U);
- длительность импульса излучения (фотодиодом ФД2 и осциллографом Tektronix TPS 2024B);
- температуру поверхности пластины (пирометром pIRo-850).

Разрушение пластины термоупругими напряжениями контролировали визуально.

На рис. 4 показаны результаты расчетов по уравнениям (9) и (10) и результаты экспериментов. Каждая экспериментальная точка получена статистической обработкой десяти измерений. Из рис. 4 видно, что пластины толщиной менее 0,3 см и более 2 см выдерживали нагрев импульсным лазерным излучением до температуры отжига без разрушения термоупругими напряжениями. Пластины толщиной от 0,4 до 2 см были разрушены термоупругими напряжениями при плотности энергии меньшей, чем требуется для достижения поверхностью пластины температуры отжига. Результаты эксперимента вполне удовлетворительно согласуются с результатами расчетов.

Заключение

В рамках несвязанной квазистатической задачи термоупругости получено аналитическое соотношение, являющееся критерием термпрочности пластины со свободной поверхностью из диэлектрических и полупроводниковых материалов при импульсном лазерном отжиге. Это соотношение позволяет определять неразрушающие режимы лазерной обработки диэлектрических и полупроводниковых материалов, а также предъявлять требования по термпрочности к вновь разрабатываемым материалам. Проведена экспериментальная проверка адекватности модели расчета, показавшая хорошее совпадение результатов расчетов и эксперимента.

Библиографический список

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 664 с.
2. Sarychev, A. Electrodynamics of metamaterials / A. Sarychev, V. Salaev. – NY: World Sci. Publ., 2007. – 247 p.
3. Stepanov, A. L. Recent research development in applied physics / A. L. Stepanov, D. E. Hole. – Kuala (India): Transworld research network, 2002. – P. 1–26.
4. Wood, R. A. Annealing of ion implanted silver colloids in glass / R. A. Wood, P. D. Townsend, N. D. Skelland, D. E. Hole, J. Barton, C. N. Afonso // J. Appl. Phys. – 1993. – V. 74. – P. 5754–5757.
5. Коваленко, А. Ф. Определение неразрушающих режимов термообработки диэлектрических и полупроводниковых пластин / А. Ф. Коваленко // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2003. – № 2. – С. 39–42.
6. Коваленко, А. Ф. Неразрушающие режимы импульсного лазерного отжига стеклянных и керамических пластин / А. Ф. Коваленко // Стекло и керамика. – 2006. – № 7. – С. 31–33.
7. Бакеев, А. А. Исследование термоупругих напряжений, возникающих в поглощающем слое вещества под действием лазерного импульса / А. А. Бакеев, А. П. Соболев, В. И. Яковлев // ПМТФ. – 1982. – № 6. – С. 92–98.

8. Коваленко, А. Ф. Экспериментальная установка для исследования влияния параметров лазерного импульса на разрушение неметаллических материалов / А. Ф. Коваленко // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 4. – С. 119–124.
9. Способ обработки неметаллических материалов. Пат. на изобретение. RUS 2211753. / В. М. Атаманюк, А. Ф. Коваленко, И. В. Левун, А. В. Федичев
10. Коваленко, А. Д. Основы термоупругости / А. Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 240 с.
11. Феодосьев, В. И. Соппротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М.: Наука, 1986. – 512 с.
12. ГОСТ 13659–88. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 48 с.
13. Блистанов, А. А. Акустические кристаллы. Справочник / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, Н. В. Переломова, Ф. Н. Стрижевская, В. В. Чкалова, М. П. Шаскольская. – М.: Наука, 1982. – 632 с.
14. ГОСТ 15130–86. Стекло кварцевое оптическое. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 34 с.
15. ГОСТ 9411–90. Стекло цветное оптическое. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 48 с.

Статья поступила в редакцию 21 января 2014 г.

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2014, vol. 17, no. 3, pp. 206–210.

Method of Determining Nondestructive Pulse Laser Annealing Modes for Dielectric and Semiconductor Wafers

Aleksandr Fedorovich Kovalenko¹ — Dr. Sci. (Eng.), Profssor (alexanderfkov@yandex.ru); Aleksei Aleksandrovich Vorobiev¹ — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory (vorobievall@mail.ru).

¹Peter the Great Strategic Missile Forces Military Academy, 9/5 Kitaygorodsky proezd, Moscow 103074, Russia

Abstract. Single-side heating of a wafer with a free surface by pulse laser annealing has been analyzed within a quasi-static uncoupled thermal elasticity problem. An analytical relationship has been obtained that can be used as a criterion of wafer thermal stability and helps determining nondestructive modes of pulse laser processing for dielectric and semiconductor wafers. A calculation model has been obtained in the assumption of temperature-independent thermophysical, mechanical and optical properties of the materials. An experimental verification of the adequacy of the calculation model has shown quite a satisfactory agreement between the calculation and experimental data.

Key words: laser processing, wafer, quasi-static thermal elasticity problem, nondestructive modes, dielectric and semiconductor materials.

References

1. Grigor'yants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. Technological laser machining processes. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2008. 664 p. (In Russ.)
2. Sarychev A., Salaev V. *Electrodynamics of metamaterials*. NY: World Sci. Publ., 2007. 247 p.
3. Stepanov A. L., Hole D. E. *Recent research development in applied physics*. Kuala (India): Transworld Research Network, 2002, pp. 1–26.
4. Wood R. A., Townsend P. D., Skelland N. D., Hole D. E., Barton J., Afonso C. N. Annealing of ion implanted silver colloids in glass. *J. Appl. Phys.* 1993, vol. 79, pp. 5754–5757. DOI: 10.1063/1.354194

5. Kovalenko A. F. The definition of nondestructive treatment of the dielectric and semiconductor plates. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2003, no. 2, pp. 39–42. (In Russ.)
6. Kovalenko A. F. Nondestructive regimes of laser pulse annealing of glass and ceramic plates. *Steklo i keramika*. 2006, no. 7, pp. 31–33. (In Russ.)
7. Bakeev A. A., Soboлев A. P., Yakovlev V. I. The studying of thermoelastic stresses in absorbing slave data under the action of the laser pulse. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1982, no. 6, pp. 92–98. (In Russ.)
8. Kovalenko A. F. An Experimental setup for studying the effect of laser pulse parameters on damage to nonmetallic materials. *Instrumentrs and Experimental Techniques*. 2004, vol. 47, no. 4, pp. 529–533.
9. Patent 2211753 (RUS). *Sposob obrabotki nemetallicheskih materialov* [Method of processing nonmetallic materials]. V. M. Atamanyuk, A. F. Kovalenko, I. V. Levun, A. V. Fedichev. Bull. Izobr., 2003, no. 25.
10. Kovalenko A. D. *Osnovy termouprugosti* [Principles of thermoelasticity]. Kiev: Naukova dumka, 1970. 240 p. (In Russ.)
11. Feodos'ev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Nauka, 1986. 512 p. (In Russ.)
12. GOST 13659–88. *Steklo opticheskoe bestsvetnoe. Fiziko-khimicheskie kharakteristiki* [Optical glass colorless]. Moscow: Izd. Standartov, 1988. 48 p. (In Russ.)
13. Blistanov A. A., Bondarenko V. S., Perelomova N. V., Strizhevskaya F. N., Chkalova V. V., Shaskol'skaya M. P. *Akusticheskie kristally. Spravochnik* [Handbook of acoustic crystals]. Moscow: Nauka, 1982. 632 p. (In Russ.)
14. GOST 15130–86. *Steklo kvartsevoe opticheskoe* [Optical glass quartz]. Moscow: Izd. Standartov, 1986. 34 p. (In Russ.)
15. GOST 9411–90. *Steklo tsvetnoe opticheskoe* [Colored optical glass]. Moscow: Izd. Standartov, 1992. 48 p. (In Russ.)

Received January 21, 2014